

Diseño y simulación de un actuador de rigidez variable

J. López Martínez⁽¹⁾, A. Giménez Fernández⁽¹⁾, D. García Vallejo⁽²⁾, A. Jardón Huete⁽³⁾, C. Balaguer Bernaldo de Quirós⁽³⁾

*(1) Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Almería
javier.lopez@ual.es*

(2) Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Universidad del Sevilla

(3) Robotics Lab. Universidad Carlos III de Madrid

Los actuadores de rigidez variable se han desarrollado como una alternativa a los actuadores convencionales en diversas aplicaciones, como son entre otras los robots de servicio y los robots caminantes. El diseño mecánico de estos actuadores debe dar solución a nuevas necesidades que no eran tenidas en consideración en los actuadores rígidos, como la reducción del daño en caso de impacto o el ajuste de la frecuencia natural del sistema. Han sido muy diversas las soluciones propuestas hasta el momento, caracterizadas por el tipo de mecanismo implementado para variar la rigidez y posición de la articulación. En este trabajo se presenta un nuevo diseño de actuador basado en transmisión por cables, en el que un primer motor controla la posición de equilibrio del eslabón y un segundo motor se encarga de variar la rigidez de la articulación. Además, se ha simulado una situación de impacto hombre-robot para estudiar su contribución en la reducción del daño en hombre y robot.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las aplicaciones en las que los robots comparten el espacio de trabajo con el hombre están creciendo en interés [1]. En este nuevo escenario, los robots de servicio y robots asistenciales deben garantizar las condiciones de seguridad en la interacción física hombre-robot. En este sentido, los actuadores de rigidez variable (ARV) se han planteado como una solución para reducir el daño en caso de impactos [2, 3]. El concepto del ARV es desacoplar elásticamente la inercia del rotor de la inercia del eslabón, de manera que la inercia del primero no contribuya a aumentar la fuerza generada en un impacto accidental.

Si bien esto parece ser una solución prometedora, Haddadin et al. [4] sugieren cambiar la motivación de los ARV hacia la protección de la articulación del robot y la mejora del rendimiento, indicando que la flexibilidad de la reductora y eslabón típicos de un brazo robot ligero es suficiente para desacoplar la inercia del rotor de la inercia del eslabón.

El desarrollo de estos nuevos actuadores ha venido también potenciado por sus ventajas en otros campos como robótica de rehabilitación, prótesis y robots caminantes [2]. Además de reducir las elevadas fuerzas originadas en la articulación en un posible impacto, otra gran ventaja de los ARV es su capacidad de almacenar y devolver energía gracias a sus elementos elásticos pasivos. Así, el uso de estos actuadores se está extendiendo en aplicaciones donde la eficiencia energética puede ser incrementada modificando la frecuencia natural del actuador. Por ejemplo, en prótesis robóticas o en robots caminantes, la rigidez de la articulación se puede ajustar según la velocidad del paso, permitiendo un movimiento más natural y energéticamente eficiente.

Como resultado de los trabajos realizados en los distintos campos en los que tienen aplicación los ARV, se han propuesto un considerable número de prototipos. Atendiendo al concepto de funcionamiento y disposición de los elementos flexibles del actuador, se pueden agrupar en dos tipos: aquellos que tienen una configuración antagónica, y aquellos que están dispuestos en serie. En la configuración antagónica, dos elementos flexibles actúan en oposición sobre la articulación, y la posición de equilibrio y la rigidez de la articulación son

controladas por dos motores. En algunos casos estos dos motores están acoplados antagónicamente, de manera que cada uno actúa sobre uno de los elementos flexibles, modificando conjuntamente posición y rigidez [5, 6]. Si bien, desde un punto de vista energético, son preferibles los dispositivos en los que la función de los motores es independiente [7]; en este caso un motor controla la posición y el otro la rigidez de la articulación [8, 9]. En la configuración en serie sólo es necesario un elemento flexible colocado entre el motor principal, que controla la posición de equilibrio, y el eslabón; un segundo motor de menor tamaño modifica la rigidez de la transmisión [10-14].

En este trabajo se presenta el diseño de un nuevo actuador de rigidez variable, MEVASTT, cuyo mecanismo basado en transmisión por cables lo caracteriza y diferencia de otros. En el Apartado 2 se revisan los aspectos a tener en cuenta en el diseño de estos actuadores. En el Apartado 3 se expone el diseño conceptual y el modelo matemático que rige el comportamiento del actuador propuesto, seguido de la descripción de su implementación mecánica en el Apartado 4. En el Apartado 5 se realizan algunas simulaciones del impacto hombre-robot incluyendo el modelo matemático del actuador. Finalmente, en el Apartado 6 se exponen las conclusiones.

2. ASPECTOS DE DISEÑO

En un actuador rígido los requisitos de diseño más importantes son el par máximo que debe suministrar el motor y la máxima velocidad de giro. En el caso un actuador de rigidez variable aparecen otras propiedades que lo caracterizan y deben tenerse en cuenta en el diseño:

- Rango de rigidez de la articulación.
- Rango de desviación angular.
- Relación rigidez vs. desviación angular.
- Capacidad de almacenamiento de energía.

Las características de los diferentes actuadores de rigidez variable están condicionadas en gran medida por el tipo de mecanismo implementado para modificar la posición y rigidez de la articulación. Como se ha visto, los distintos tipos de actuadores se pueden agrupar en aquellos con una configuración antagónica y en aquellos con configuración en serie. Otra característica que diferencia los actuadores es la manera de modificar la rigidez de la articulación. La forma más utilizada es modificar la pretensión del componente flexible, generalmente un resorte, aunque esto presenta el inconveniente de que el motor tiene que realizar trabajo en contra de este elemento [5, 6, 8, 9, 11, 12, 14]. Otras propuestas se basan en la modificación de la longitud de un brazo de palanca, manteniéndose en este caso constante la pretensión del elemento elástico [10, 13].

A continuación se abordan los aspectos esenciales de las propiedades que caracterizan a los actuadores de rigidez variable.

- Rango de rigidez de la articulación: viene dado por los límites de rigidez máxima y mínima que puede adoptar la articulación. Si bien puede depender del tipo de aplicación, en principio resulta deseable el mayor rango posible de rigidez. La mayoría de los actuadores tienen un rango de rigidez limitado, sólo algunas propuestas como las basadas en la modificación de la longitud de palanca pueden adoptar una configuración totalmente rígida. De entre estas, el AWAS-II [13] puede alcanzar además una rigidez teóricamente nula.
- Rango de desviación angular: la desviación angular es la diferencia entre la posición de equilibrio y la posición del eslabón sometido a una carga exterior. El mecanismo debe permitir una amplitud de desviación angular suficiente, de manera que en caso de una sobrecarga (e.g. un impacto) no se alcance sus límites físicos. Una desviación angular de 15° se considera suficiente para las extremidades superiores de robots humanoides [9].
- Relación rigidez vs. desviación angular: es decir, como varía la rigidez conforme aumenta la desviación angular (curva de rigidez). En el caso de los actuadores orientados a reducir el daño suele preferir una curva de rigidez creciente [9, 11-13].

También para otras aplicaciones un aumento de la rigidez con la deformación es favorable, como es el caso de robots saltadores y piernas protésicas [14].

- Capacidad de almacenamiento de energía: esta característica está relacionada con el rango de desviación angular y con la curva de rigidez. La energía potencial elástica puede ser utilizada para absorber la energía cinética de un impacto, o para acelerar de forma intencionada el eslabón mediante un movimiento apropiado [9].

Teniendo en cuenta todos estos aspectos se plantea como una de las mejores alternativas de diseño una configuración en serie, y en la que el motor que modifica la rigidez no actúa pretensando el elemento flexible.

3. DISEÑO CONCEPTUAL Y MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se describe el principio de funcionamiento del nuevo actuador MEVASTT y se obtiene el modelo matemático que rige su comportamiento. En el proceso de diseño se han tenido presentes los aspectos abordados en el apartado anterior. El mecanismo propuesto presenta una configuración serie, donde un motor principal controla la posición de equilibrio del eslabón de salida y un segundo motor modifica la rigidez de la articulación.

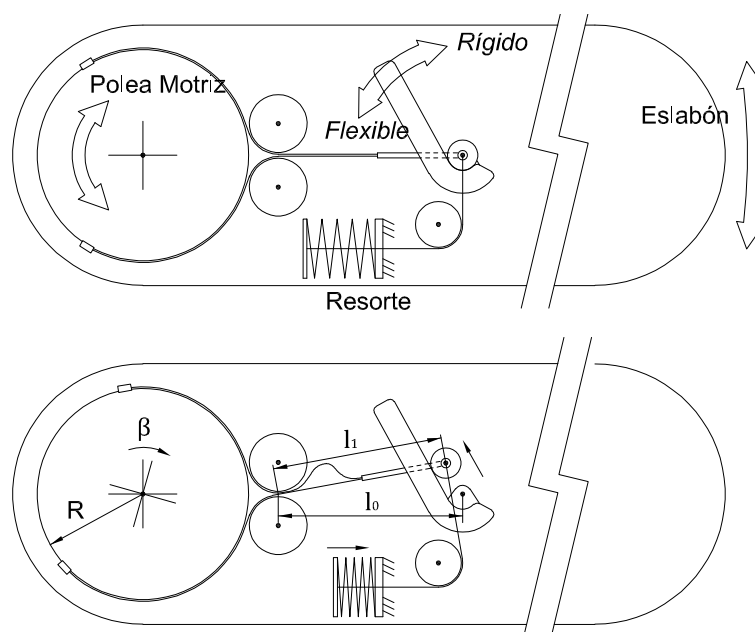


Figura 1. Diseño conceptual del actuador de rigidez variable. En posición de equilibrio (arriba) y en posición desviada bajo una carga exterior (abajo)

La figura 1 muestra el diseño conceptual del MEVASTT. Caracteriza al mecanismo el uso de un sistema basado en transmisión cable-polea. El eje de salida del motor principal actúa sobre la polea motriz en la que van fijados, por medio de dos tensores, sendos cables; los cuales, tras pasar por las poleas guías se fijan a una barra. Esta barra está articulada en su otro extremo a un rodillo que puede rodar sobre una palanca. Un tercer cable fijado al eje del rodillo es redirigido por medio de otra polea guía y fijado al extremo libre de un resorte. Cuando el motor principal ejerce par, se produce la compresión del resorte y por tanto una desviación angular β entre la polea motriz y el eslabón de salida. El valor de esta desviación indica el grado de flexibilidad o rigidez mecánica y viene dado por el ángulo de inclinación de la palanca, donde un segundo motor es el encargado de modificar dicha posición de palanca. Cuando la palanca se coloca en posición vertical (según la figura 1) el actuador es idealmente rígido, no pudiendo haber desviación entre la polea motriz y la posición del brazo. Si la palanca se posiciona horizontalmente el mecanismo adopta su configuración de máxima flexibilidad. La figura 1 muestra dos situaciones del actuador para una misma posición intermedia de palanca (rigidez intermedia): cuando el brazo está en su posición de

equilibrio, y cuando el motor principal ejerce par y se produce una desviación angular β entre la polea motriz y la posición del eslabón de salida.

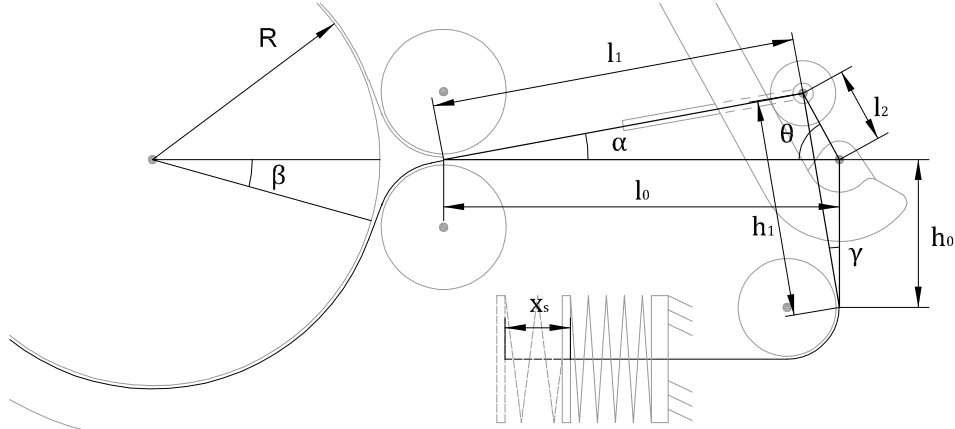


Figura 2. Esquema de funcionamiento del actuador de rigidez variable

Para caracterizar el actuador es necesario conocer la relación entre el par T ejercido por el motor principal y la desviación angular β producida. La figura 2 muestra un esquema con los parámetros necesarios para describir el par T y la rigidez de la articulación K en función de la desviación angular β . Cuando la polea motriz de radio R se desvía un ángulo β respecto de la posición de equilibrio, se produce un acortamiento de la distancia inicial del cable en la posición de equilibrio l_0 que, despreciando la curvatura del cable sobre la polea guía, pasa hasta un valor l_1 en la posición deformada según

$$l_1 = l_0 - \beta \cdot R. \quad (1)$$

En esta posición el rodillo habrá rodado sobre la palanca una distancia l_2 , que dependerá de la posición angular θ de la palanca. Resolviendo el triángulo formado por los lados l_0 , l_1 y l_2 , para l_2 y el ángulo α formado entre l_0 y l_1 ,

$$l_2 = l_0 \cdot \cos \theta - \sqrt{l_1^2 - l_0^2 \cdot \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

$$\sin \alpha = l_2 \cdot \frac{\sin \theta}{l_1}. \quad (3)$$

Al desplazarse el rodillo, el resorte sufrirá una compresión x_s dada por,

$$x_s = h_1 - h_0, \quad (4)$$

donde h_0 es la distancia inicial del cable que une el rodillo con el resorte y h_1 la distancia en la posición deformada. Siendo

$$h_1 = \sqrt{(l_1 \cdot \sin \alpha + h_0)^2 + \left(\frac{l_1 \cdot \sin \alpha}{\tan \theta}\right)^2}, \quad (5)$$

Sustituyendo convenientemente (1), (2) y (3) en (5), y posteriormente (5) en (4), esta última expresión es la relación geométrica entre la compresión del resorte x_s y la desviación angular β . Partiendo ahora de la fuerza ejercida por el resorte se calcula el par T ejercido por el motor principal. La tensión del cable del resorte será el producto de la rigidez del resorte K_s por la compresión del mismo,

$$F_s = K_s \cdot x_s. \quad (6)$$

Sobre el rodillo actuarán esta fuerza F_s , una fuerza normal a la superficie de contacto rodillo-palanca, y la fuerza ejercida por el cable de la polea motriz F_c . Resolviendo el diagrama de fuerzas se tiene que

$$F_c = F_s \frac{\sin(\theta + \gamma)}{\cos(\theta + \alpha)}, \quad (7)$$

siendo

$$\gamma = \arctan\left(\frac{l_3 \cdot \cos \theta}{h_0 + h_r}\right). \quad (8)$$

Finalmente, el par T ejercido por el actuador será

$$T = F_c \cdot R = T(R, l_0, h_0, K_s, \theta, \beta), \quad (9)$$

y derivando (9) en función de β se obtiene la rigidez torsional del actuador

$$K = \frac{dT}{d\beta} = K(R, l_0, h_0, K_s, \theta, \beta). \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) vienen expresadas en función de varios parámetros: las dimensiones del mecanismo R, l_0, h_0 , la rigidez lineal del resorte K_s , el ángulo de palanca θ y la desviación angular β . Para un actuador dado, los cuatro primeros parámetros serán fijos, y la posición de palanca θ será controlada por el motor secundario. En el siguiente apartado se dimensiona el mecanismo y se muestran las curvas de par y rigidez del actuador en función de la desviación angular β para distintas posiciones de palanca θ .

4. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA

La figura 3 muestra el diseño mecánico del MEVASTT. El motor que genera el movimiento de giro del eslabón es un motor Maxon de CC con un par nominal de 0.4 Nm, acoplado a una reductora con relación 100:1. El motor que varía la rigidez del mecanismo es un motor Maxon de CC y par pico de 0.14 Nm, donde el movimiento de la palanca que varía la rigidez se realiza a través de un engranaje de tornillo sinfín irreversible con relación 60:1. El resorte empleado tiene una rigidez de 80.5 kN/m y una compresión máxima de 34 mm, que limita la desviación angular del mecanismo a 54° para la configuración de mínima rigidez.

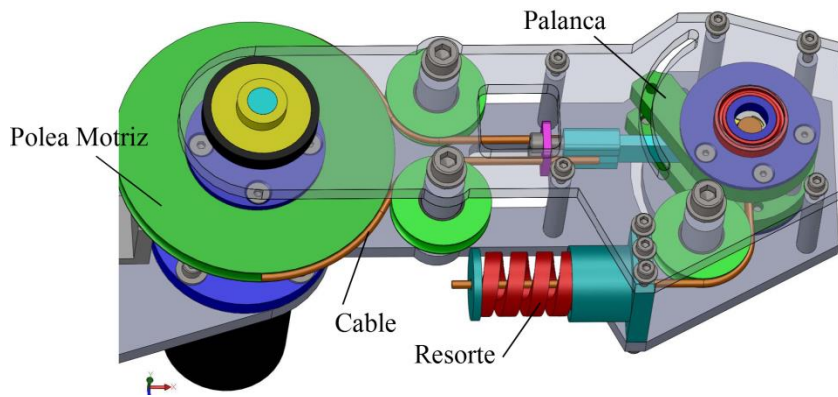


Figura 3. Diseño mecánico en 3D del MEVASTT

En la figura 4 se representan las curvas par-desviación angular para distintas posiciones de la palanca y según las dimensiones del MEVASTT ($R = 7$ cm, $l_0 = 15.1$ cm, $h_0 = 4.7$ cm). Las curvas muestran una pendiente creciente con el ángulo, llegando a ser verticales al alcanzar el límite del mecanismo en el que el cable de la polea motriz se hace perpendicular a la palanca. En la misma figura 4 se representan las curvas de rigidez-desviación angular, que

tienen un comportamiento también creciente. En la tabla 1 se resumen las especificaciones generales del nuevo actuador, donde este primer prototipo se ha sobredimensionado con el objetivo de poder someterlo a ensayos de impacto severos sin que se vean dañados sus componentes. Un diseño de menores dimensiones es fácilmente obtenible para su empleo en brazos robots convencionales.

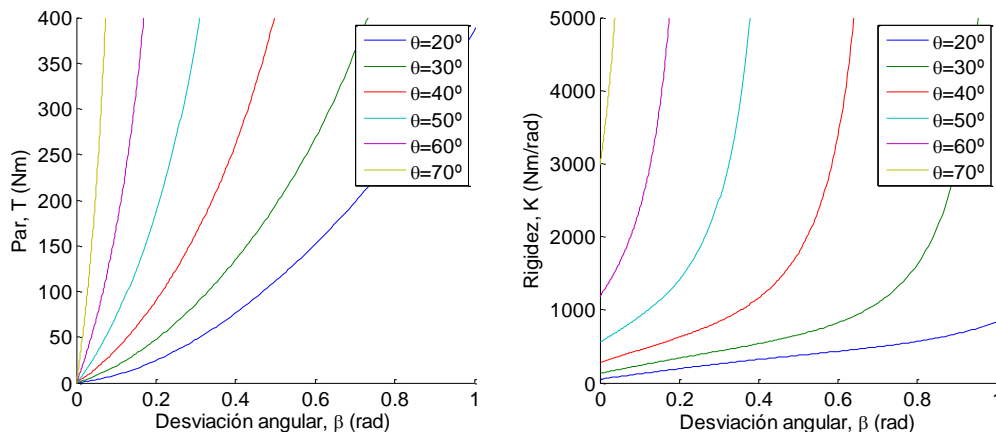


Figura 4. Curvas par T -desviación angular β (izquierda) y rigidez K -desviación angular β (derecha) para distintas inclinaciones de palanca θ

Propiedad	Valor
Par nominal (Nm)	40
Desviación angular máxima (°)	54
Rango de rigidez (Nm/rad)	casi nulo ~ rígido
Máximo almacenamiento de energía (J)	46
Largo x Ancho (m)	0.29 x 0.15
Masa (kg)	4.8

Tabla 1. Especificaciones generales del MEVASTT

5. SIMULACIÓN DEL IMPACTO HOMBRE-ROBOT

Para evaluar el rendimiento del actuador se ha estudiado su contribución a la reducción del daño en una situación de impacto entre un brazo robot de 1 g.d.l. y una cabeza humana. En el modelo de impacto (figura 5) se han considerado los parámetros del brazo: inercia equivalente del rotor y reductora en el eje de salida I_r , rigidez de la reductora K_r , inercia de la polea motriz del actuador I_p , rigidez del actuador K y longitud L_e e inercia I_e del eslabón (este último término incluye parte de la inercia del actuador). El contacto entre el extremo del eslabón y la cabeza humana se ha simulado con el modelo de contacto Kelvin-Voigt, que considera un resorte lineal K_c y un amortiguador D_c en paralelo. El modelo se completa con la masa de la cabeza M_h , y considerando el caso en el que su movimiento está restringido por una superficie (e.g. una pared), la rigidez K_w y amortiguamiento D_w de este contacto.

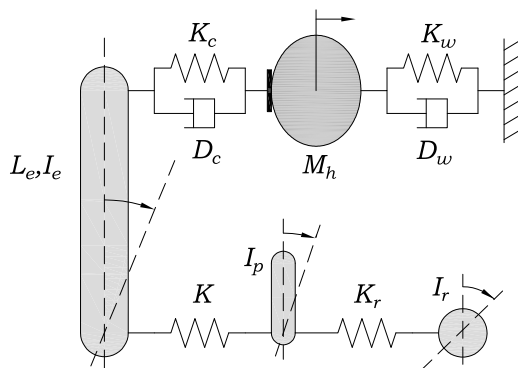


Figura 5. Modelo de impacto

La tabla 2 incluye los valores asignados a los parámetros del modelo. Si el brazo robot no tiene cobertura flexible para absorción de impactos, la rigidez del contacto viene determinada por la rigidez del cráneo, que se encuentra dentro del rango de 1.4 a 3.6 (10^6) N/m [15]. Este mismo valor se ha utilizado para el contacto entre la cabeza y la superficie rígida que restringe su movimiento. En las simulaciones se asume que el brazo se mueve en un plano horizontal con velocidad angular constante de 2 rad/s y el motor no ejerce par.

Propiedad	Valor
Masa (kg)	$M_h = 4.5$ kg
Inercia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	$I_r = 0.64$, $I_p = 1\cdot 10^{-3}$, $I_e = 0.25$
Rigidez	$K_r = 1.6\cdot 10^4$ Nm/rad, $K_c = K_w = 3.6\cdot 10^6$ N/m
Amortiguamiento (Ns/m)	$D_c = D_w = 10$
Longitud (m)	$L_e = 0.7$

Tabla 2. Parámetros del modelo de impacto

La figura 6 muestra la evolución en el tiempo de la fuerza de contacto entre el eslabón y la cabeza para distintas posiciones de palanca, donde no se aprecia una disminución de dicha fuerza con la reducción de la rigidez del ARV. Sin embargo, sí es evidente la contribución de la reducción de la rigidez en la disminución de los elevados picos de par que se transmiten a la reductora en el impacto. La figura 6 muestra los valores de par para distintas rigideces del actuador. Para la posición de mayor rigidez el par máximo supera los 200 Nm, valor muy superior a los 75 Nm admisibles por la reductora. Una reducción en la rigidez del actuador permite no sobrepasar este máximo, evitando daños mecánicos en el robot. Este comportamiento frente a la reducción de la rigidez del ARV está en la misma línea de trabajos anteriores [4, 16], donde no se obtiene una disminución de la fuerza de contacto pero sí del par transmitido a la reductora.

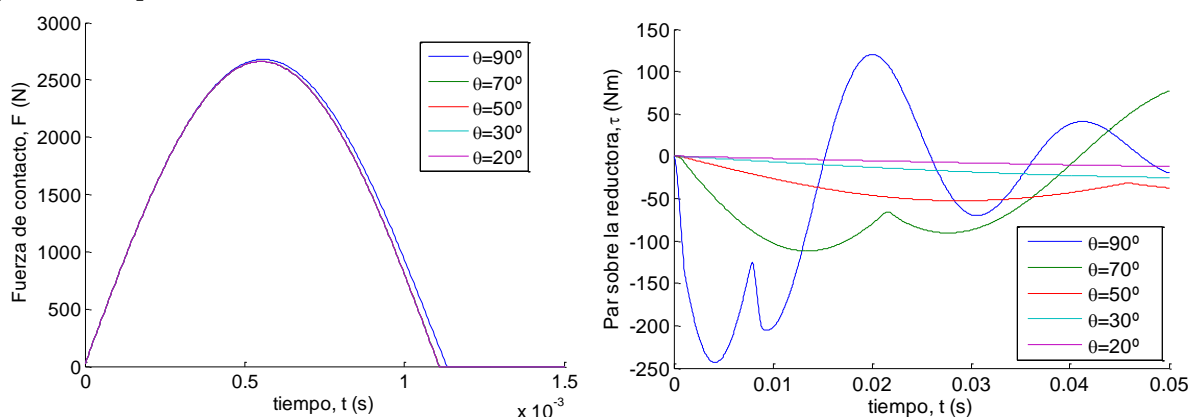


Figura 6. Fuerza de contacto (izquierda) y par sobre la reductora (derecha) para distintas inclinaciones de palanca θ

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un nuevo actuador de rigidez variable. El diseño se ha resuelto con una configuración en serie, donde un primer motor controla la posición de equilibrio del eslabón y un segundo motor se encarga de variar la rigidez de la articulación. El mecanismo implementado permite cumplir con los requisitos de diseño que se plantean para este tipo de actuadores. El actuador presenta amplios rangos de desviación angular y rigidez, pudiendo alcanzar una configuración totalmente rígida. Las simulaciones realizadas para una situación particular de impacto entre un brazo robot y la cabeza de un hombre reflejan que la reducción de la rigidez de actuador contribuye notablemente a la disminución del daño en la articulación del robot; por el contrario, no se obtiene una reducción apreciable en la fuerza de contacto sobre la cabeza del usuario. Este comportamiento no es directamente extensible a cualquier situación de impacto, es necesario un estudio particular de cada robot y cada escenario de impacto para predecir la

contribución del ARV en la disminución de la fuerza de contacto. Para validar las simulaciones realizadas se están llevando a cabo ensayos de impacto, cuyos resultados serán presentados en futuros trabajos.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo los proyectos DAVARBOT (DPI 2011-22513) y ARCADIA (DPI2010-21047-C02-01), y por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía a través del programa FPDU 2008, RoboCity2030-II-CM project (S2009/DPI-1559), financiado por Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid cofinanciado por la Unión Europea a través del programa European Regional Development Fund (ERDF).

7. REFERENCIAS

- [1] C. Balaguer, A. Gimenez, A. J. Huete, A. M. Sabatini, M. Topping, G. Bolmsjo, *The MATS robot*, IEEE Robotics and Automation Magazine, 13 (2006), 51-58.
- [2] V. R. Ham, T.G. Sugar, B. Vanderborght, K.W. Hollander, D. Lefeber, *Compliant actuator designs: Review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications*, IEEE Robotics and Automation Magazine, 16 (2009), 81-94.
- [3] A. Bicchi, G. Tonietti, *Fast and "soft-arm" tactics*, IEEE Robotics and Automation Magazine, 11 (2004), 22-33.
- [4] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, O. Eiberger, G. Hirzinger, *New insights concerning intrinsic joint elasticity for safety*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, (2010).
- [5] S. A. Migliore, E. A. Brown, S. P. DeWeerth, *Biologically inspired joint stiffness control*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, España, (2005).
- [6] R. Schiavi, G. Grioli, S. Sen, A. Bicchi, *VSA-II: A novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, California, USA, (2008).
- [7] B. Vanderborght, R. V. Ham, T. G. Sugar, K. W. Hollander, *Comparison of mechanical design and energy consumption of adaptable, passive-compliant actuators*, International Journal of Robotics research, 28 (2009), 90-103.
- [8] W. Hurst, J. Chestnutt, A. Rizzi, *The actuator with mechanically adjustable series compliance*, IEEE Transactions on Robotics, 26 (2010), 597-606.
- [9] O. Eiberger, S. Haddadin, M. Weis, A. Albu-Schäffer, *On joint design with intrinsic variable compliance: derivation of the DLR QA-joint*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, (2010).
- [10] B. S. Kim, J. B. Song, *Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, (2010).
- [11] D. Hyun, H. S. Yang, J. Park, Y. Shim, *Variable stiffness mechanism for human-friendly robots*, Mechanism and Machine Theory, 45 (2010), 880-897.
- [12] S. Wolf, G. Hirzinger, *A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, California, USA, (2008).
- [13] A. Jafari, N. Tsagarakis, D. Caldwell, *AwAS-II: A New Actuator with Adjustable Stiffness based on the Novel Principle of Adaptable Pivot point and Variable Lever ratio*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, (2011).
- [14] B. Vanderborght, N.G. Tsagarakis, C. Semini, R.V. Ham, D.G. Caldwell, *MACCEPA 2.0: Adjustable compliant actuator with stiffening characteristic for energy efficient hopping*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, (2009).
- [15] H. McElhaney, L. Roberts, f. Hilyard, *Handbook of Human Tolerance*. Japan Automobile Research Inst., (1976).
- [16] J. López-Martínez, D. Garcia Vallejo, J. L. Torres, A. Giménez, J. A. López, *Role of Link Flexibility and Variable Stiffness Actuator on Collision Safety for Service Robots*, European Conference on Mechanism Science, Santabder, Spain, (2012).